국내 재래종 벼 유전자원의 중배축 신장 특성 평가

박소연¹ · 장성규¹ · 이주현² · 권순욱^{1*}

¹부산대학교 식물생명과학과, ²건국대학교 식량자원과학과

Evaluation of Mesocotyl Elongation Ability in Korean Rice Landraces (*Oryza sativa* L.)

So-Yeon Park¹, Seong-Gyu Jang¹, Joohyun Lee², and Soon-Wook Kwon^{1*}

¹Department of Plant Bioscience, Pusan National University, Miryang 50463, Republic of Korea

²Department of Crop science, Konkuk University, Seoul 05029, Republic of Korea

Abstract Rice landrace germplasms are highly valuable because of their wide genetic variation. Their traits have not been selected by modern breeders but by nature, thus, these traits and the gene associated with them have tremendous potential to improve modern rice cultivars. The first step to utilize this potential is to conduct a thorough evaluation of the target traits to select superior germplasm for a breeding program. Here, with 386 Korean landrace germplasms, we evaluated mesocotyl elongation traits which possibly promote direct seedling cultivation in rice. Mesocotyl length ranged from 0 mm to 28 mm. Among the tested landraces, we selected and reported the top 20 performing landraces whose mesocotyl length were larger than 16 mm. The previously reported agronomic traits for the selected 20 landraces were also listed for breeders to promote the utilization of these germplasms in breeding programs.

Keywords Rice landrace, Mesocotyl elongation, Directly seedling, Germplasm

Received on August 3, 2019. Revised on September 23, 2019. Accepted on October 10, 2019.

* Corresponding Author (E-mail: swkwon@pusan.ac.kr, Tel: +82-55-350-5506, Fax: +82-55-350-5509)

서 언

재래종은 육종기술의 발전 이전에 자연 또는 재배자의 무의식적인 선택으로 고정된 유전자원이다(Camacho Villa et al. 2005). 재래종은 우수한 유전적 다양성을 지니고 있는데, 벼에서는 분자 마커를 이용한 다양성 검정을 통해 국내 재래종 집단이 육성종 집단보다 더 높은 다양성을 가지고 있음을 확인한 바 있다(Kwon et al. 2000). 또한 국내 재래종 유전자원 76점에 대해 유전다양성을 분석한 결과 마커 별 평균 PIC 값이 0.58로 보고되었는데(Lee et al. 2015), 이는 729개 벼 유전자원에서의 PIC 값이 0.29이고, 아시아 국가의 유전자원을 평가한 PIC 값이 0.50으로 보고(Lee et al. 2018)한 것보다 높은 다양성을 보인 것이다. 국내 재래종 벼 유전자원 394점에 대해 집단구조 분석을 수행한 결과 3개의 집단으로 구분되었으며, 집단 1과 3은 대부분의 자포니카형을, 집단 2는 인디카형을 포함하고 있었다(Li et al. 2014).

재래종 벼 유전자원에 대한 특성 평가는 농촌진흥청에서 출수기, 초형 등 기본 농업형질과 미질 특성, 영양성분 및 기능성 성분 함량 등 활용도 증진을 위한 특성 평가가 수행된 바 있으며

(Kang et al. 2008), 흰잎마름병 저항성을 평가하여 저항성 유전자원을 보고한 바 있다(Li et al. 2011). 최근에는 재래종 유전자원의 향 특성 등 최근의 소비자 요구에 부합되는 다양한 형질에 대한 평가가 이루어진 바 있으며(He & Park 2015), 다수의 우수 자원이 선발되었다. 이러한 결과는 국내 재래종 유전자원들의 잠재적 가치를 보여준다고 할 수 있다. 따라서 재래종 집단을 이용한다면 목적 형질을 갖는 우수한 자원을 선발할 수 있을 것이며, 최근에는 생물 다양성 협약으로 인한 유전자원 활용의 제한이 생기면서 재래종 활용의 중요성은 더욱 높아질 것이다. 재래종 유전자원 중 떡 가공적성이 우수한 재래종 유전자원 ‘돈나’를 활용하여 ‘효원2호’와 ‘효원4호’ 벼를 육성한 바 있으며(Lee et al. 2016, Jang et al. 2017), ‘자광도’를 활용한 ‘자광찰’ (Kim et al. 2005), ‘중모1033’(Jeong et al. 2019)이 육성되었다. 또한 ‘가위찰’을 활용한 ‘후가위찰’(Kim et al. 2006)이 보고된 바 있으나, 여전히 그 활용이 미미한 실정이다.

벼는 국내에서 농업 및 식량안보에서 큰 비중을 차지하고 있다. 하지만 도시 유입 인구의 증가에 따라 농촌 인구는 지속적으로 감소하고 고령화 되고 있으며 벼 재배에 필요한 노동력의

부족과 사회 여건의 변화에 따라 국내 벼 재배 면적은 지속적으로 감소하고 있다. 또한 인건비와 유통비의 상승으로 쌀의 생산비용은 올라갔지만 쌀 소비량 감소로 인해 쌀 가격은 하락하게 되어 쌀 생산 농가에 부담이 늘어나고 있다. 이러한 상황에서 쌀 생산 단가를 줄이기 위한 방법 중 하나로 직파재배가 대두되고 있다. 직파재배는 이앙재배와 달리 육묘, 이앙과정이 생략되므로 노동력 소모가 적다. 따라서 직파재배를 이용하면 투여되는 노력과 소모비용을 줄일 수 있는데, 조사된 바에 따르면 건답직파의 경우 20%, 답수 직파에서는 32%의 생산비 절감 효과를 보인다고 했다(Lee et al. 1996). 직파재배에서는 이앙재배와 달리 벼 종자가 일정기간 생육을 거치지 않고 곧바로 본답에 노출되기 때문에 직파재배에 사용되는 벼 품종은 이앙재배와는 다른 특성이 요구되는데, 대표적으로 중배축 신장성이 있다. 직파재배에서 중배축의 신장은 입모율에 큰 영향을 미치는 요인으로 작용하는데(Lee et al. 2017), 일반적으로 인디카 품종이 자포니카 품종에 비해 중배축의 신장이 더 뚜렷하며, 그 변이 또한 인디카 품종군에서 더 크게 나타나는 것으로 보고된 바 있다(Takahashi 1978). 또한 발버 품종들이 논벼 품종들보다, 서남아시아 품종들이 동아시아 품종들보다 신장성이 강한 것으로 보고되었다(Wu et al. 2005, Takahashi 1995, Chang and Vergara 1975).

중배축 신장에 관여하는 QTLs는 2개의 자포니카 품종 교배 후대의 고세대 RIL 집단으로부터 5개의 QTLs가 보고되었으며(Huang et al. 2010), Kasalath와 Nipponbare 교배 후대 집단에서 *qMEL-1*, *qMEL-3* 그리고 *qMEL-6* 세 개의 QTLs가 보고되었다(Lee et al. 2017). 그리고 최근 유전체 분석 기술의 발달로 전장유전체 연관분석(GWAS)이 이루어짐에 따라 중배축 관련 다수의 유전자와 영역이 보고되고 있다. 170개 미니코어 집단과 100개 내한발성과 관련된 자원을 이용하여 중배축 신장성에 대해 연관 분석하여 1, 3, 4, 5, 6과 9번 염색체에서 유의한 영역이 보고되었고(Wu et al. 2015), 469개 인디카 유전자원을 이용한 중배축 신장성과 관련된 유전자로 Os01g392100, Os01g0904700, Os04g0630000, Os07g0615000가 보고되었으며(Lu et al. 2016), 3,000 Rice Genome Project가 완료됨에 따라 이를 이용한 GWAS 결과들이 보고되고 있다(Zhao et al. 2018). 하지만 국내 자원의 경우, 중배축 신장성에 대한 자원 평가 및 활용 가능한 자원 선발이 부족한 실정이다.

본 연구에서는 재래종 벼 유전자원에 대한 중배축 신장성 검정을 통해 유용한 자원을 선별하여 육종 및 유전자 연구를 위한 자원 선발을 수행하고, 생물다양성 협약에 대응한 우리나라의 유전자원 개발 및 활용에 기초 자료를 얻고자 수행되었다.

재료 및 방법

식물 재료

농촌진흥청 농업유전자원센터로부터 분양 받은 재래종 벼 유전자원 394점을 부산대학교에서 증식하여 사용하였고, 이 중 증식되지 않은 8점을 제외한 386점에 대한 중배축 신장성 평가를 수행하였다. 대조 품종인 Nipponbare, Kasalath는 충남대학교 농업생명과학대학에서 분양 받아 사용하였다.

중배축 신장 평가

대조품종을 포함하여 총 386개 자원의 중배축 신장성 평가는 Lee et al. (2012)의 방법에 따라 72.00 × 72.00 × 100.00 (mm)의 Incu tissue (SPL Life science Co, Kyeonggi, Korea)에 0.3%의 Agar (Duchefa Biochemi, Haarlem, NLD) gel 배지에서 수행하였다. 공시 된 재래종 유전자원들과 대조품종은 육안으로 건전 종자를 선종하여 1%의 차아염소산나트륨에 10분간 침지 소독하고, 증류수로 세척하였다. 준비된 종자는 자원 당 20립씩 0.3% Agar gel에 치상하였고, 14일 간 30℃의 암조건에서 생육 후 중배축 길이를 측정하였다(Fig. 1). 중배축 길이는 치상 된 20립 중 임의의 5개체를 대상으로 종자의 배반과 초엽(coleoptile) 사이의 길이를 측정하여 이들의 평균값을 이용하였고, 재래종 386점과 대조품종에 대해 생물학적 2반복을 수행하였다.

결과 및 고찰

중배축 신장성 다양성

중배축 길이 신장의 형질은 토양 속에서 성장하는 중배축의 특성상 환경의 영향을 많이 받는다. Wu et al. (2015)은 중배축 길이에 대한 변이의 폭과 반복 간 차이가 수경재배 조건에서 토양 재배 조건에 비해 변이 폭이 크고 반복 간 낮은 상관을 보고 하였다. 또한 토양 재배 시 복토 깊이에 따라 품종 간 중배축 신장성의 변이도 크다고 보고하여 중배축 신장성 평가는 환경적 요인 존재 시, 유전자 효과의 검정이 어려운 것으로 보고하였다. 본 실험에서는 균일한 환경을 제공하고자 토양 조건과 유사하면서 압력이 0.3Mpa 이하로서 뿌리 및 지상부 신장을 억제하지 않는 것으로 보고된(Clark et al. 1999) 0.3% agar gel에서의 실험을 수행하였다. 반복간 상관관계수는 $R^2=0.771$ 로 다소의 변이는 존재하였으나 반복간 재현성이 있음을 확인하였다. 즉, 본 실험에 활용된 중배축 길이평가방법으로 각각의 유전자원의 중배축 신장에 관여하는 유전적인 능력을 평가할 수 있음을

확인하였다. 직파재배 적응성 형질로 알려진 중배축 신장성에 대한 정확한 유전자의 탐색 및 이를 활용한 육종 소재의 개발에는 인공 토양에 기반을 두는 정밀한 환경조절 실험과 실제 포장조건에서의 평가가 동반되어야 할 것이며, 환경변이에 대한 정밀한 평가를 위하여 충분한 반복 실험이 진행되어야 할 것이다.

대조 품종 Nipponbare는 평균 1 mm, Kasalath는 13 mm로 중배축 신장을 보였다(Fig. 2). 재래종 386점의 평균 표현형은 0 mm~28 mm 범위로 나타났다. 길이별 빈도 수 측정결과 중배축이 자라지 않은 품종이 42종(10.8%)으로 조사되었으며, 0.0 mm~5.0 mm 구간에서 184 accessions (47.4%), 5.0 mm~10.0 mm 내 97 accessions (25%), 10.0 mm~20.0 mm 58 accessions (15%), 20.0 mm~30.0 mm 내 7 accessions (1.8%)가 포함되었다. 표현형 길이 평가 시 평균, 중앙값, 최빈값의 순서로 작아지는 정적비대칭을 띄웠고, 왜도 값 1.41로 표현형들 간 비 정규분포를

보였다(Fig. 3). 평가된 재래종 유전자원 386점 중 요남조(要南租, IT007740), 인부지나도(隣不知나稻, IT008199), 쇠벤치기(IT006776), 대골도(大骨稻, IT005742) 등을 포함하는 42개 품종은 중배축의 신장이 관찰되지 않았으며, 대부분의 유전자원들이 중배축 신장성이 약한 경향을 가졌으나 일부 유전자원들은 강한 중배축 신장성을 나타내었다. ‘얇은뱅이(IT007486)’, ‘육성재래 陸城在來, IT010555)’, ‘백곡나(IT006302)’, ‘덕적조도(IT005994)’, ‘긴까락샤레(IT173446)’, ‘한양조(漢陽租, IT009060)를 포함하는 6개의 유전자원은 공통적으로 20 mm 이상의 강한 중배축 신장성을 나타내었다. Li et al. (2014)는 국내 재래종 유전자원의 집단구조 분석결과 3개의 집단으로 구분하였는데, 자포니카 품종은 집단 1 (178점)과 집단 3 (108점)으로 구분되었고, 인디카 품종은 집단 2 (38점)에 속한다고 보고하였다. 각각 집단의 평균 중배축 길이는 각각 6.16 mm, 8.11 mm, 3.61 mm로

Fig. 1. Methods of evaluating mesocotyl elongation. (A) 20 rice seeds inside of the agarose gel for each magenta box. (B) Dark treatment by covering aluminum foil for 14 days.

Fig. 2. Measuring of Mesocotyl length of the control varieties. (A) a low vigor control variety ‘Nipponbare’, (B) a high-vigor control variety ‘Kasalath’

조사되어 인디카 그룹(집단 2)에서 중배축 신장성이 높게 나타났다. 이는 Takahashi (1978)의 결과와 일치하였다.

Fig. 3. Distribution of mesocotyl length of 386 Korean rice landrace.

재래종 유전자원의 활용성

실험에 사용한 한국 재래종 자원 중 높은 중배축 신장성을 가진 상위 약 5%에 해당하는 20개 자원을 Table 1에 정리하였다. 재래종 유전자원의 중배축 신장성과 간장과 수장(농업유전자원 센터)과의 상관분석 결과, 중배축과 간장 간 상관계수는 0.217로 1%수준에서 유의한 정의 상관을 보였으나, 중배축과 수장 간에는 유의성이 인정되지 않았다. 다만 선발된 상위 5% 유전자원에서는 중배축 신장과 간장간 상관성이 인정되지 않았고, 품종육성 측면에서 중배축 신장성이 양호하면서 초장이 작은 자원이 유리할 것으로 사료된다. 현재 국내에서 이용되고 있는 직파재배 적응성 품종으로는 농안벼, 주안벼, 안산벼, 동안벼 등이 보급되어 있으며, 직파재배 적응성 품종으로 저온발아성이 높으며 높은 초기 신장률로 입모율이 안정적인 품종이 장려되고 있다. 또한 미질 및 수량성이 좋은 품종을 선호하기 때문에 직파재배 외에도 다른 농업 형질이 중요하게 고려되고 있다. 상위 약 5%에 해당하는 20개 품종 중 우수한 농업형질을 나타내는 육성재래, 귀입파리

Table 1. Some agricultural traits of high mesocotyl elongation ability rice landrace.

IT Number	Variety	Mesocotyl Length (mm)	Grain length (mm) ^z	Grain width (mm) ^z	Awn ^y	Heading Date ^y	Culm Length (cm) ^y	Panicle Length (cm) ^y	Panicles/plant ^y	Lodge ^y	Leaf Blast ^y	Amylose Contents ^y
IT007486	Anjeunbaengi	28.0	6.8	3.3	None	8.25	70	24	10	R ^x	-	19%
IT010555	Yukseongjaerae	26.5	7.0	3.4	None	8.2	88	-	8	R	M	25%
IT006302	Baekgokna	24.5	7.3	3.5	Short/Few	8.6	110	23	5	M	S	6%
IT005994	Deokjeokjodo	24.5	7.0	3.6	Existence	7.31	101	21	12	M	M	17%
IT173446	Ginggalagsyale	24.5	7.3	2.8	None	8.3	114	22	-	-	-	21%
IT009060	Hanyangjo	23.0	7.8	3.4	None	8.14	102	23	13	R	S	31%
IT009187	Hwangtodo	20.5	6.4	3.5	Existence	8.16	95	20	6	M	M	19%
IT010627	Joseokjo	20.0	7.4	3.6	Short/Few	7.29	92	21	8	R	S	16%
IT010374	Sando	20.0	7.8	3.5	Existence	8.5	95	21	7	R	S	18%
IT005044	Guwangdo	19.0	6.2	3.4	Short/Lot	8.27	107	30	8	M	-	19%
IT010612	Jodo	19.0	7.2	3.6	None	8.2	100	20	6	R	S	17%
IT006556	Sando	19.0	7.2	3.6	Existence	8.5	83	22	7	M	S	18%
IT006596	Samkyeongjo	19.0	7.1	3.4	Short/Lot	8.5	85	17	12	S	-	24%
IT008700	Jwiipparibyeo	18.5	6.9	3.4	Short/Few	8.12	99	20	15	S	-	17%
IT005504	Noinjo	17.5	6.9	3.4	Existence	8.19	109	22	8	M	S	17%
IT006372	Baekjo	17.0	6.9	3.6	Existence	8.16	99	24	10	M	S	18%
IT008749	Chalbyeo	16.5	7.7	3.3	Short/Lot	8.6	92	24	10	M	S	6%
IT007807	Yue	16.0	6.7	3.5	Short/Lot	8.19	116	24	16	S	-	17%
IT006078	Monajo	16.0	6.9	3.6	Short/Lot	8.16	93	20	8	S	S	5%
IT010340	Batnarak	16.0	7.2	3.6	None	8.7	97	20	9	M	S	22%

^zEvaluation average of 20 seeds measured by Vernier calipers

^yThese data acquired from the database of National Agrobiodiversity Center (<http://genebank.rda.go.kr/simpleSearch.do>)

^xR: Resistant, M: Moderate, S: Susceptible

벼, 찰벼, 말나락 품종은 중배축 신장에 의한 직파재배 적합성 뿐만 아니라 양질의 품질 및 수량성을 나타내어 추후 교배 모본으로 이용하기에 적합할 것으로 보인다. 그러나 대부분 재래종 유전자원이 도열병 등 각종 병해충에 이병성이고 도복성에 취약하므로 품종 개발 단계에서 저항성 확보에 대한 고려가 필요할 것이다.

적 요

재래종 유전자원은 다양한 유전적 다양성 때문에 높은 가치를 지니고있다. 재래종 자원은 자연변이에 의해 선택되어 현대 품종 개선과 관련된 높은 잠재성을 가지고 있다. 이러한 잠재성을 이용하기 위한 첫 번째 단계는 유용 자원을 선발하는 과정이다. 본 연구에서는 벼 직파재배 적응성을 확대할 수 있는 중배축 신장성에 대해 국내 재래종 벼 유전자원 386점에 대해 평가하였다. 직파재배는 쌀 생산 단계와 노동력 감소에 효과적인 재배 방법으로 대두되고 있으나, 잡초경합과 초기 입모율 확보의 어려움이 있다. 중배축 신장성은 초기 입모율 확대에 큰 영향을 미치는 요인으로 직파재배 확대에 중요한 형질이다. 본 연구에서 암조건에서 평가된 재래종 유전자원의 중배축 길이는 0 mm~28 mm의 범위를 보였다. 특히 16 mm 이상의 중배축 신장성이 큰 재래종 유전자원 20점(5%)을 선발하였고, 이들의 출수기, 간장, 주당 분얼 수 등 기본 농업 형질과 종실 특성 및 까락 여부, 생태형 등을 검토하여 유용 육종소재를 제공하였다.

사 사

이 논문은 정부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(NRF-2017R1E1A1A01075282, NRF-2015R1C1A1A01054699)의 성과임.

보충자료

본문의 Supplementary Table 1은 한국육종학회지 홈페이지에서 확인할 수 있습니다.

REFERENCES

1. Camacho Villa T, Maxted N, Scholten M, Ford-Lloyd B. 2005. Defining and identifying crop landraces. *Plant Gen*

- Res Charact Util. 3: 373-384.
2. Chang T, Vergara BS. 1975. Varietal diversity and morpho-agronomic characteristics of upland rice. In "Major research in upland rice". International rice research institute, Manila, Philippines. pp 72-90.
3. Clark LJ, Whalley WR, Leigh RA, Dexter AR, Barraclough PB. 1999. Evaluation of agar and agarose gels for studying mechanical impedance in rice roots. *Plant Soil* 207: 37-43.
4. He Q, Park YJ. 2015. Discovery of a novel fragrant allele and development of functional markers for fragrance in rice. *Mol Breeding* 35: 217.
5. Huang C, Jiang S, Feng L, Xu Z, Chen W. 2010. Analysis of QTLs for Mesocotyl length in rice (*Oryza sativa* L.). *Acta Agronomica Sinica* 36: 1108-1113.
6. Jang SG, Lee AR, Im DE, Wang H, Park YG, Lee YS, Cho YH, Kwon SW. 2017. Medium maturing glutinous rice variety 'Hyowon 4'. *Korean J Breed Sci* 49: 52-56.
7. Jeong EG, Won YJ, Ahn EK, Hyun UJ, Cho YC, Suh JP, Oh MK, Lee JH, Hong HC, Lee CK, Jeon YH, Jeung JU, Chung HC, Kim BK. 2019. 'Jungmo1033', a derivative of high-quality native rice variety 'Jagwangdo'. *Korean J Breed Sci* 51: 34-40.
8. Kang JH, Kwak JG, Kim TS, Na YW, Ma KH, Park YG, Lee SY, Lee JR, Jo GT, Choi YM. 2008. Catalogue of Korean native rice germplasm preserved in RDA genebank. Suwon, National agrobiodiversity center.
9. Kim KH, Jeong YP, Lee JH, Chung IM. 2005. A new functional glutinous rice "Jakwangchal" selected from a cross of Korean local variety. *Proc. of the International Symposium on Plant Genetic Resources and Annual Meeting of the Korean Breeding Society*. pp. 131-131.
10. Kim KH, Jeong YP, Lee JH. 2006. A new glutinous rice with black-purple pericarp "Heukgawichal". *Proc. of 2006 Joint Symposium of the Korean Breeding Society and the Korean Society for Plant Biotechnology*. pp. 45-45.
11. Kwon SJ, Ahn SN, Suh JP, Hong HC, Kim YK, Hwang HG, Moon HP, Choi HC. 2000. Genetic diversity of Korean native rice varieties. *Korean J Breed Sci* 32: 186-193.
12. Lee AR, Jang SG, Im DE, Park SY, Jun TH, Yoon MY, Ra WH, Park YG, Cho YH, Kwon SW. 2016. A medium-late maturing glutinous rice variety, 'Hyowon 2' with short clum. *Korean J Breed Sci* 48: 384-389.
13. Lee HJ, Seo JH, Jung YS, Park JK. 1996. Low-input and energy efficiency of direct seedling method in rice. *Korean J Crop Sci* 41: 115-122.

14. Lee HS, Sasaki K, Higashitani A, Ahn SN, Sato T. 2012. Mapping and characterization of quantitative trait loci for mesocotyl elongation in rice (*Oryza sativa* L.). *Rice* 5: 13.
15. Lee HS, Sasaki K, Kang JW, Sato T, Song WY, Ahn SN. 2017. Mesocotyl elongation is essential for seedling emergence under deep-seeding condition in rice. *Rice* 10: 32.
16. Li FP, Lee YS, Kwon SW, Li G, Park YJ. 2014. Analysis of genetic diversity and trait correlations among Korean landrace rice (*Oryza sativa* L.). *Genet Mol Res* 63: 16-31.
17. Li X, Cho HB, Choi JE, Lee SY, Kang HK. 2011. Genetic analysis of bacterial blight (*Xanthomonas oryzae* pv. *oryzae*) resistance in Korean native rice. *Korean J Intl Agri.* 23: 503-506.
18. Lu Q, Zhang M, Niu X, Wang C, Xu Q, Feng Y, Wang S, Yuan X, Yu H, Wang Y, Wei X. 2016. Uncovering novel loci for mesocotyl elongation and shoot length in indica rice through genome-wide association mapping. *Planta* 243: 645-657.
19. Takahashi, N. 1978. Adaptive importance of mesocotyl and coleoptile growth in rice under different moisture regimes. *Funct Plant Biol* 5: 511-517.
20. Takahashi K, Watanabe H, Hoshikawa K. 1995. Varietal differences and geographical distributions in the growth of mesocotyl and internodes of rice (*Oryza sativa* L.) seedlings. *Japan J Crop Sci* 64: 66-72.
21. Wu J, Feng F, Lian X, Teng X, Wei H, Yu H, Xie W, Yan M, Fan P, Li Y, Ma X, Liu H, Yu S, Wang G, Zhou F, Luo L, Mei H. 2015. Genome-wide association study (GWAS) of mesocotyl elongation based on re-sequencing approach in rice. *BMC Plant Biol* 15: 218.
22. Wu M, Zhang G, Lin J, Cheng S. 2005. Screening for rice germplasms with specially-elongated mesocotyl. *Rice Sci* 12: 226-228.
23. Zhao Y, Zhao W, Jiang C, Wang X, Xiong H, Todorovska EG, Yin Z, Chen Y, Wang X, Xie J, Pan Y, Rashid M, Zhang H, Li J, Li Z. 2018. Genetic architecture and candidate genes for deep-sowing tolerance in rice revealed by non-syn GWAS. *Front Plant Sci* 9: 332.

Supplementary Table 1. List of Korean rice landraces and their phenotype

No.	Accession Name	IT Number	No.	Accession Name	IT Number
1	HAMBUREUBYEO 3	009065	198	MONGGEUNCHANARAK	006100
2	CHINDADACHIGI	008897	199	KWOL NADO	k026157
3	CHOEBUJI	008850	200	CHANARAK	008732
4	MUYEOPSEOLDO	006119	201	SEUNGNA	k026158
5	PALCHEONDO	008983	202	AGGUDICHAL	k026159
6	MUSAEKJOJEOKJO	006114	203	TAEGUNA	k026160
7	AEDAL	007532	204	YEJO	k026161
8	MITDARAE	006242	205	BAEK CHEON	006385
9	MUANDO	006116	206	YONGJO	k026162
10	CHINDADACHIGI	008895	207	MOJO	006089
11	MODO	006087	208	GWAKSANJO	004899
12	JONAJO	008438	209	OLBYEO	007687
13	YUE	007807	210	DAEGUDO	005762
14	MIJO	006151	211	HWANGJO	009173
15	GAKSJEOMJO	004694	212	AGABYEO	007436
16	HEUINDADAK	009264	213	SSANMADEURAGI	006577
17	BAEKHYANGJO	006397	214	HONGCHEONGDO	009138
18	GANGSANBYEO	004768	215	JODONGJI	008469
19	MAEKDO	006064	216	DONGSANJO	005946
20	DORAE	005908	217	DUCHUNGJONG	005987
21	PATBYEO	008984	218	JOSAENGJODO	010625
22	MUDARAEGI	006103	219	BEOBPANHWA	006410
23	JUJODO	008599	220	YEONANJO	007598
24	JOTAJO	008580	221	GWANSANSAEK	004914
25	MIDO	006138	222	SSALBYEO	006578
26	BAEKJO	006372	223	YEOLNA	007604
27	GANGCHEONGDO	004775	224	SUKNA	007274
28	TAEGUJO	k026144	225	BULDO	006520
29	JEONGJO	008401	226	CHEONJEUNGDO	008804
30	ORIDO	007631	227	DAEGOLDO	005742
31	KYEONGJOBABKJO	004839	228	DADEOGBEREUMBYEO	005689
32	OLMUTGE	007684	229	AGUDO	007442
33	POCHEONJANGMANGMEBYEO	008996	230	NAMGANGBAEKJO	005223
34	WAEJO	007721	231	JARAEJONGNA	k026163
35	SANDUDO	006560	232	HWANGDAIOLBYEO	009169
36	NOINJO	005504	233	CHEONPUNGDO	008806
37	OLWAEDU	007693	234	CHEONGGUNBYEO	008816
38	BAEK CHEON	006386	235	JANMOCHAL	k026164
39	GEUM JEOM DO	005133	236	ORIDO	007629
40	JEOKSUDANGAN	008361	237	HWANGJO	009174
41	BADOLBYEO	006243	238	BANDALBYEO	006258
42	BEODEULBYEO	006400	239	BAEKCHALBYEO	006380
43	JODUJO	008471	240	DAN DU NA	005882

Supplementary 1. Continued.

No.	Accession Name	IT Number	No.	Accession Name	IT Number
44	YEOUSSALBYEO	007596	241	JAERAJODO	008293
45	YEJO	007622	242	CHEONGSANDO	008820
46	JANGSAMDO	008268	243	BULJO	006522
47	BAEKGWANGOK	006310	244	CHULRAESAN	k026165
48	SANDADAGIDO	006551	245	ANJEUNBAENGI	007487
49	DAMAGUNG	005694	246	JJOLJANGBYEO	008591
50	BANCHONJO	006266	247	HANSUJINDO	009059
51	SEUNGSILJO	007286	248	POCHEONRYUKDO	010707
52	HEUINDADAK	009265	249	PYODO	008999
53	NOKDUBYEO	005660	250	HOGYEONJINDO	k026166
54	JAERAEDO	008289	251	CHEONJUDO	008798
55	DONGOBYEO	005970	252	GUDONGNA	k026167
56	DADAJO	005679	253	ANNAMJO	007464
57	ANJEUNBAENGI	007486	254	IRAKDO	007999
58	MIGWANG	006129	255	HONGDODO	009123
59	BAEKJICHEONGBYEO	006376	256	HONGNA	009117
60	JINANDO	008717	257	WEONJONA	k026168
61	DAEGWANDO	005754	258	JODO	008413
62	BAEKGYEONGJO	006298	259	GANGWEONDO	010161
63	BAEKJANGGUN	006366	260	AGUKDO	007446
64	BAEKSEOK	006354	261	HANGIBUJI	009056
65	JEONGGEUMJO	008382	262	JANGMANGJAERAE	010577
66	EUNJO	007975	263	POCHEONYUMANGCHAL	010704
67	GE	4811	264	HWANGJU	009182
68	GUWANGDO	005044	265	BATNARAK	010339
69	HAERIM	009069	266	SANGDO 1	006622
70	SHIRORI	k026145	267	HANNAEBYEO	009057
71	CHIMABYEO	008888	268	PYEONGBUK 4	008986
72	GUCHEONDO	005057	269	SANDO	010375
73	GUHWANGJO	005070	270	DEULLEONGDEULCHIGIBYEO	006000
74	SEORIANJEUNBAENGI	006663	271	SOENBENCHIGI	006776
75	HAENGPUNG	009077	272	BORIBYEO	006424
76	JUNGANJEUNBAENGI	008672	273	OLBYEO	007688
77	GAORI	004697	274	HWANGTOJO	009191
78	MONAJO	006078	275	BEONJO	006404
79	SEOKSANNA	006684	276	GAKSSINA	k026169
80	JEOKBAKNA	008357	277	DAEGOLDO	005743
81	ANNA	007460	278	CHALBYEO	008749
82	BAEKGOKNA	k026146	279	EUMEUCHAL	007903
83	OKCHEONG	k026147	280	HWANGTODO	009189
84	BAEKGOKNA	006302	281	GANGREUNGDO 106	004760
85	NEULBYEO	010275	282	CHIGYEONGDO	008883
86	GAWICHAL	010151	283	WAENGCHALBYEO	007714

Supplementary 1. Continued.

No.	Accession Name	IT Number	No.	Accession Name	IT Number
87	SANDUCHALBYEO	110944	284	JODO	008453
88	NEULBYEO	010276	285	NADO	k026170
89	ICHEON7ILCHAL	010565	286	KANGNUNGDO	k026171
90	BEONGOK	010345	287	MUJUDO	006125
91	JOSEON	010628	288	YANGDO	007570
92	YONDALICHALBYEO	010480	289	DANDUNA	k026172
93	WEONSANCHALBYEO	151696	290	HONGSAEKDO	009129
94	DONNA	k026148	291	JACHINA	k026173
95	YEONNADO	k026149	292	GEUMDO	005126
96	JJOK-JE-BI-CHAL	010630	293	DOAJI	005915
97	JJOK-JE-BI-CHAL	010631	294	HONGDUNA	k026174
98	NADO	005206	295	JINHWA	008725
99	JODO	010612	296	JEOKSEONGNA	k026175
100	YUKSEONGJAERAE	010555	297	SUKNA	007270
101	JOSEOKJO	010627	298	DONGSANJO	005948
102	HEUKPI	010727	299	CHANARAK(B)	008734
103	HEUKPI	010728	300	NOINDO	005506
104	HEUKMOK	010726	301	WEOLJO	007801
105	SANDO	006556	302	JEOKMOSAEK	008355
106	SANDO	010374	303	SSALBYEO	k026176
107	HWASEONGBATCHAL	010721	304	YULJOJO	k026177
108	BATNARAK	010340	305	WEOLJO	k026178
109	SANDUDO	010376	306	DEOKJEOKJODO	005993
110	JWIIPPARIBYEO	008700	307	GEUM CHANG DO	005142
111	JAERAHEYUKDO	010582	308	CHIMABYEO	008891
112	JEONGGIJOSAENG	008385	309	DAEJODO	005835
113	JAERAEJONGDO	008296	310	NAENGDO	005216
114	NADO	005205	311	BANDALBYEO	006260
115	JAERAEJOJO	008295	312	HWANGJODO	009180
116	YONGMYEONHEUK	007742	313	CHEONGSONGJO	008831
117	JEONA	008310	314	HWANGJO	009177
118	GASANBYEO	004692	315	DDANGJO 131	006010
119	GUANDO	005040	316	MAEKJO	006066
120	JONGJOBAEKJO	008590	317	YEOSUBYEO	007592
121	JEONGJONGHWA	008408	318	SULLSULLDO	007278
122	SODUJO	010417	319	JANDADAGI	008255
123	HAEJO	009073	320	HONGDODO	009120
124	OJEONGGEUN	007660	321	MODO	k026179
125	DADAJO	005681	322	MODO	006084
126	OIGUKBYEO	007717	323	JANGJO	008277
127	HONGDO	009118	324	NINADO	010274
128	PYEONGYANG	008992	325	SANDO	006554
129	PALDADO	008951	326	SODUJO	006735

Supplementary 1. Continued.

No.	Accession Name	IT Number	No.	Accession Name	IT Number
130	SUWEONJO	007245	327	SEOKSANJO	006687
131	SANDUDO	006559	328	JOJEONGDO	008579
132	CHANSEOBYEO	008741	329	SOEMEORIJJANG	006772
133	DADUJO	005693	330	HYANGGOK	009078
134	SINBAEKSEOK	007389	331	DABAEKJO	005716
135	HEUINBE	009267	332	JEONGRAKDO	008390
136	DANGDO	005893	333	PALJUNGSU	008981
137	YONGCHEON	007746	334	SUJUNGJO	007254
138	ORIDO	007630	335	SSEUNDEGI	007290
139	PUNGUJO	009023	336	DADOA EK	005691
140	ICHEONCHUNG GUBYEO	008189	337	GUWEOLDO	005046
141	OBAEKJO	007634	338	DUCHUNGJONG	005989
142	BUJARI	006483	339	HWANGJO	009172
143	NOINDO	005508	340	DAIGOLBYEO	005718
144	GUIDO	005095	341	BARAMDUNG GURI	006247
145	CHEONJUDO	008799	342	HURINA	k026180
146	SUTDARKBYEO	007282	343	HWANGTODO	009187
147	NOINJO	005505	344	DADAJO	005682
148	SEOGANDODO	006657	345	YEOLSULBYEO	007605
149	DADAJO	005683	346	JEOKDO 16	008344
150	JOSEOKDO	008528	347	NAMI2	k026181
151	PALCHEONDO	008982	348	SAMKYEONGJO	006596
152	NEUSEUBYEO	005677	349	GUN JO	005076
153	JAERAESUYEOMBYEO	008286	350	DUDO	005980
154	JOSLBICHAL	155896	351	INBUJINADO	k026182
155	DDANGBYEO	006005	352	YONGCHEON	007747
156	DAEJICHAL	155895	353	YUKWEOLJO	007900
157	MUMOJOEOKJO	k026150	354	DONNA	k026183
158	OBAEKJO	007633	355	JANGJO	008278
159	EOREUMBYEO	007578	356	GUJUNGDO	005052
160	HONGSADO	009128	357	HWANGHAEDO	009192
161	SADUCHO	006538	358	JEONA	k026184
162	AENGMI	007559	359	HEUKNAJO	k026185
163	JAGWANGDO (AWN ABSENT)	173444	360	JEOMJO	k026186
164	NOINDO	005509	361	GATORIJ E	k026187
165	JAGWANGDO (AWN PRESENT)	173445	362	GUISIMCHAL	155897
166	GUHWANGDO	005068	363	CHICHABYEO	k026188
167	HYOSEONGJAERAEJONG	009221	364	HEUKGAENG	009229
168	NEUZDALKBYEO	005678	365	HONGCHEONCHALBYEO	009590
169	CHANSEOBYEO	008743	366	JEOLHEUGNA	k026189
170	GANGDODO	004753	367	NOKDUDO	005657
171	SOEMEORIBYEO	006768	368	HOMINA	k026190
172	NADO	k026151	369	DOAJICHAL	k026191

Supplementary 1. Continued.

No.	Accession Name	IT Number	No.	Accession Name	IT Number
173	DEOKJEOKJODO	005994	370	GUJUNGDO	005051
174	WEONJABYEO	007792	371	HEUKDO	009251
175	JANGSAMDO	008267	372	ARONGBYEO	007458
176	GANGWEONNA	004771	373	HEUKDAEGU	009233
177	GANGWEONDO	004770	374	HEUKJEODO	009244
178	GINGGALAGSYALE	173446	375	HEUDO	k026192
179	SUSANGJO	006818	376	BAEKHAEDAL	006396
180	NOINDARI	005500	377	YEOBYEO	007585
181	GODUDO	004861	378	HEUKJEODO	009245
182	JOSEONDO	008530	379	EUMJO	007981
183	JAGWANGDO	203619	380	MUSANDO	006112
184	JEKSEON	k026152	381	JEOSAEEKDO	008314
185	SEON	k026153	382	HEUKSAEKDO	009243
186	GANGBAEDO	004769	383	HEUKJEONGDO	009250
187	HANYANGJO	009060	384	SEONDAL	006699
188	DALGOLMOT	k026154	385	INBUJINADO	008199
189	CHALBYEO	k026155	386	YONAMJO	007740
190	DAESONA	k026156	387	SUNDAL	009797
191	SANGDO	006620	388	NANGJO	k026193
192	GGAEBYEO	004688	389	BAEKGOKNA	006303
193	DAEGUNA	005756	390	MONDONCHALBYEO	k026194
194	DAIGOLNA	005736	391	SSUBYEO	007268
195	JEONGDALDO	008388	392	BAEKMANGJO	006328
196	JINDO	008710	393	YUNA	k026195
197	INBUJIDO	008196	394	HWADO	009142